

3. Выводы

С помощью моделирования процесса воздействия звуковой волны на крио – консервирующую среду, содержащую биологические объекты в низкочастотном приближении получены аналитические формулы для расчета колебательной скорости и избыточного дав-

ления, возникающие в крио – консервируемой среде в результате дифракции звуковой волны на биологическом объекте. Эти формулы являются основой для анализа процесса массопереноса частиц крио – консервирующей среды к поверхности биологических объектов при наличии акустических колебаний.

Литература

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике [Текст] / Бергман Л. – М.: ИЛ, 1956. – 726 с.
2. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. [Текст] / Абрамовиц М., Стиган И. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
3. Морс Ф., Фешбах Г. Методы теоретической физики. [Текст] / Морс Ф., Фешбах Г. – М.: Мир, 1960, Т. 2. – 886 с.
4. Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковой технологии. Под редакцией проф. Л.Д. Розенберга. [Текст] / Л.Д. Розенберг. – М.: Наука, 1970. – 687 с.

Опрацьовано спосіб формування антикорозійних захисних покриттів. Досліджено їх ерозійну та корозійну стійкість. Розроблені покриття нанесені на робочі лопатки частини низького тиску парових турбін ТЕС. Термін експлуатації в умовах електростанцій більше 150 тис. годин

Ключові слова: теплоенергетичне обладнання, покриття, антикорозійне, властивості

Разработан способ формирования антикоррозионных защитных покрытий. Исследованы их эрозионная и коррозионная стойкости. Разработанные покрытия нанесены на рабочие лопатки части низкого давления паровых турбин ТЭС

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, покрытие, антикоррозионное, свойства

The way of formation of anticorrosive coatings is developed. Are investigated their erosive and corrosion resistance. The developed coverings are put on working blends to a part of low pressure of steam turbines TES

Key words: the heat power equipment, a covering, anticorrosive, properties

УДК 669.056.9

ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

В. Г. Маринін

Кандидат фізико-математичних наук, доцент,
старший науковий співробітник
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій, відділ інтенсивних вакуумно-плазмових технологій
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»
вул. Академічна, 1, м. Харків, Україна, 61108
Контактний тел.: (057) 3356825
E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

1. Вступ

Дані експлуатаційних спостережень на теплових і атомних електростанціях показали, що зниження коефіцієнта використання встановленої потужності енергоблоків, зменшення ефективності, надійності та економічності роботи станцій пов'язане, в першу чергу, з руйнуванням елементів обладнання завдяки дії механічного та хімічного чинників. Так, за причини

відмови обладнання 2-го контуру АЕС недовиробка електроенергії складає 22,9 % від загальної недовиробки [1]. В залежності від того, який із чинників домінує, має місце ерозія або корозія, а при одночасній їх дії – ерозійно-корозійний знос. Ерозія найчастіше обумовлена мікроударами крапель води, наприклад, в лопатках останніх ступенів парових турбін, струменями потоків води в згинах трубопроводів та дією кавітації. Корозію обумовлюють домішки різних хімічних речо-

вин в парі, пароводяному конденсаті, воді під тиском та в осаді на обладнанні. Наприклад, за даними роботи [2] в окремих місцях на трубах парогенераторів наявні відкладення, зокрема, на ПГВ-1000 товщиною 1,5 мм, що відповідає забрудненості 350...5000 г/м². Проведені також фірмою Вестінгауз дослідження складу домішок в парі на великій кількості турбін показали наявність більш ніж 160 надійно ідентифікованих хімічних сполук, хоч не всі вони присутні в одній турбіні [3]. Кількісно ерозійно-корозійний знос залежить як від величини руйнівних чинників, так і від властивостей металів, які використовують для виготовлення обладнання [4]. В зв'язку з цим, виникає необхідність в розробці методів їх зміцнення та захисту від ерозії і корозії, що сьогодні є актуальним питанням матеріалознавства.

2. Завдання досліджень

Оскільки одним із способів збільшення стійкості обладнання і експлуатаційного ресурсу є нанесення на поверхню захисних покриттів [5], то, відповідно до цього, метою роботи були розробка способу формування захисних, в першу чергу антикорозійних, покриттів і проведення дослідження їх ерозійних та корозійних характеристик.

3. Обладнання та методики досліджень

Для оцінки можливості застосування того чи іншого металу для нанесення антикорозійних покриттів проведено порівняння значення їх стандартних електродних потенціалів у розчинах води при 25 °C із стандартним потенціалом заліза, який дорівнює -0,44 В. Розглянуто метали, які мають потенціал, менший за стандартний потенціал заліза, і встановлено, що стандартні потенціали Al, Ti, Zr, Nb, Cr мають, відповідно, наступні негативні значення: 1,663; 1,662; 1,529; 1,099; 0,913. З урахуванням також того факту, що в розчині 0,5н NaCl коефіцієнт пасивності (відношення поляризації анода до поляризації катода) для титану дорівнює 2,44 і є максимальним порівняно з іншими металами, то в даній роботі для формування покриттів вибрано Ti. Покриття для досліджень одержані на установці типу «Булат», за допомогою джерела металевої плазми, схему і опис якого подано в монографії [6]. В джерелі змінена, порівняно з описаними, геометрія концентратора магнітного поля.

Катод вакуумного дугового розряду виготовляли з титану BT1-0, кальцієстермічного цирконію. Силу струму дугового розряду змінювали від 65 до 135 А в залежності від типу покриття. На зразок, який покривали, подавали негативний потенціал від 0 до 200 В. Камеру відкачували парооливовим дифузійним насосом до тиску $1,33 \times 10^{-3}$ Па. Температуру зразків при осадженні покриттів вимірювали хромель-алюмелевою термопарою, яку встановлювали в середину зразка на відстані 1 мм від поверхні. Осаджень проводили на поліровані зразки із сталей 1X18H10T, 05X18H9, 15X11MФ при тисковій азоту у вакуумній камері, який змінювали в інтервалі $1,33 \times 10^{-3}$...1,33 Па. Структуру зразків вивчали на металографічних шліфах за допомогою світлової мікроскопії, а рентгеноструктурні

дослідження покриттів на дифрактометрі ДРОН4-07 із скінтіляційним лічильником у випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ по рентгенооптичній схемі Брега-Брентано. Мікротвердість (H_μ) зразків вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,49 Н, а шорсткість на профілометрі А-П моделі 283. Абразивний знос досліджували по схемі площа - диск. На пласку поверхню зразка наносили покриття, а диск виготовляли із матеріалу, в якому жорстко закріплено абразивні зерна. Швидкість руху поверхні диска, що контактує з покриттям, дорівнює 4,38 м/с, навантаження на зразок 2,2 Н.

Ерозійну стійкість зразків вимірювали на установці, опис якої наведено в роботі [7]. При її роботі сигнал від генератора ультразвукових коливань подавали на магнітострикційний перетворювач, який механічно з'єднаний із концентратором експоненціального профілю. Під торцевою поверхнею концентратора формувалась зона з розвинутою кавітацією. В цій зоні розміщували зразки на відстані 0,55 мм від торцевої поверхні концентратора. Амплітуда коливань торцевої поверхні концентратора дорівнювала 30 ± 2 мкм, а частота 20 кГц. Ерозію зразків вимірювали гравіметричним методом. Точність вимірювань вагових втрат $\pm 0,015$ мг.

За експериментальними даними будували кінетичні криві в координатах «вагові втрати – час дії кавітації». Середню швидкість руйнування визначали за величиною кута нахилу дотичної до кінетичної кривої на відрізку, що характеризує лінійну або близьку до неї залежність. За швидкістю руйнування обчислювали кавітаційну стійкість (Z_h).

Корозійні дослідження проведені для визначення середньої швидкості корозії в 3 та 22 % водних розчинах NaCl. Дані з електрохімічної корозії одержані за допомогою потенціостату ПИ50-1 в стандартній електрохімічній комірі ЯЕС-2 в умовах природної аерації розчину. Анодні поляризаційні криві одержано при зміні потенціалу зі швидкістю 1 мВ/с. Електродом порівняння слугував хлор-срібний електрод. Результати приведено до нормального водневого електроду.

Детальні металографічні дослідження структури одержаних конденсатів проведені на поперечних шліфах. На рис.1 показано мікрофотографії характерних структур покриттів.

Видно, що в загальному плані при зростанні температури зразка спостерігається зміна структури, яка подібна до встановленої в роботі [8]. До температури близько 200 °C структура складається, в першу чергу, із великої кількості крапель різного розміру з поганою фіксацією міжкристалітної границі (рис.1а). При зростанні температури до 370 °C спостерігається поступове формування стовпчастої структури. Ширина стовпчастих кристалітів збільшується, а кількість крапель зменшується, що обумовлено також дією іонної компоненти (рис.1в). При температурі 500...575 °C стовпчасти кристаліти поступово переходять до більш рівноважних, які виникають в першу чергу ближче до поверхні, на якій формується покриття (рис.1г).

Рентгеноструктурний аналіз покриттів завтовшки до 100 мкм показав, що незалежно від потенціалу і температури поверхні, на якій формується покриття, воно складається із однієї фази α -Ti. Параметри гексагональної кристалічної ґратки в залежності від технологічних параметрів формування покриттів відрізняються на 1×10^{-4} від наведених в довіднику [9].

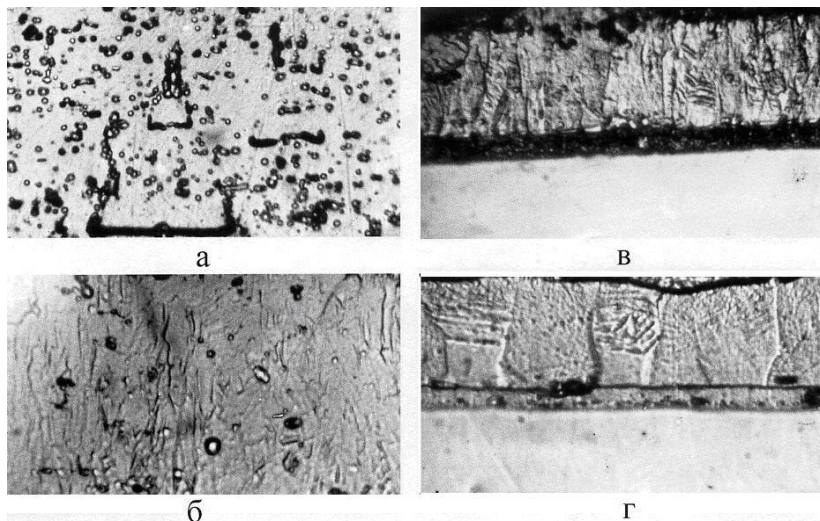


Рис. 1. Мікрофотографії структури покриттів в залежності від температури їх формування. а – 80; б – 290; в – 400; г – 600 °C

Мікродоформації фіксуються на рівні $0,0045 \pm 0,0005$ в залежності від величини негативного потенціалу зразка. При температурі формування 300...400 °C спостерігається текстурованість покриттів з переважною орієнтацією площини [211] паралельно поверхні конденсації.

Досліджено вплив сили струму дугового розряду (I_d), потенціалу підкладки на мікротвердість, кавітаційну стійкість, температуру зразка при тискові у вакуумній камері близько 2×10^{-4} Па. На рис.2 приведено залежності H_μ та Z_h від величини негативного потенціалу (U) на зразкові для різної відстані (L) від катода вздовж нормалі до нього та для різних I_d .

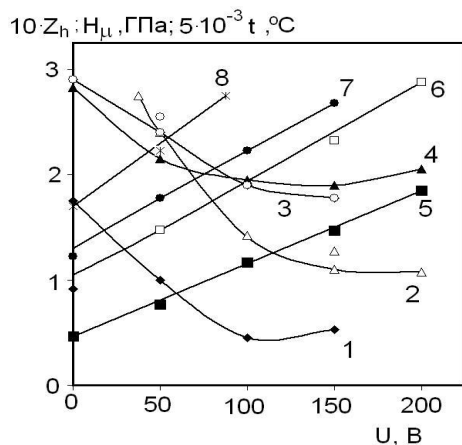


Рис. 2. Залежність Z_h (1,2); H_μ (3,4); t (5-8) покриттів від величини негативного потенціалу. Для $L=200$ мм (3,4,7,8); $L=300$ мм (1,2,5,6), при $I_d=65$ А (5,7,1,3); $I_d=135$ А (2,6,4,8).

Загальним є зменшення величин Z_h та H_μ при збільшенні U . При збільшенні сили струму (I_d) і величини негативного потенціалу спостерігається зростання температури (t), при якій відбувається формування покриттів. Встановлено, що абсолютні значення мікротвердості змінюються по товщині покриття. Так, покриття завтовшки 70 мкм, одержане протягом 5 годин

при $I_d=65$ А, $U = -100$ В, $L = 300$ мм, має мікротвердість на поверхні 2,05 ГПа, біля поверхні – 1,95 ГПа, біля підкладки – 2,34 ГПа. Кавітаційна стійкість, яка визначена за швидкістю руйнування в глибину покриття (Z_h), зменшується при зменшенні відстані між зразком та катодом (L) при фіксованій силі струму дугового розряду, що пов'язане із збільшенням кількості крапель в покритті. Мікротвердість покриття до потенціалу -100 В при $L = 200$ мм вища порівняно з одержаною при $L = 300$ мм. При подальшому збільшенні величини потенціалу ($|U| > 100$ В) ситуація змінюється на протилежну. Для фіксованого значення L кавітаційна стійкість зменшується пропорційно збільшенню сили струму.

Взаємозв'язок між Z_h і H_μ

репрезентує рис. 3.

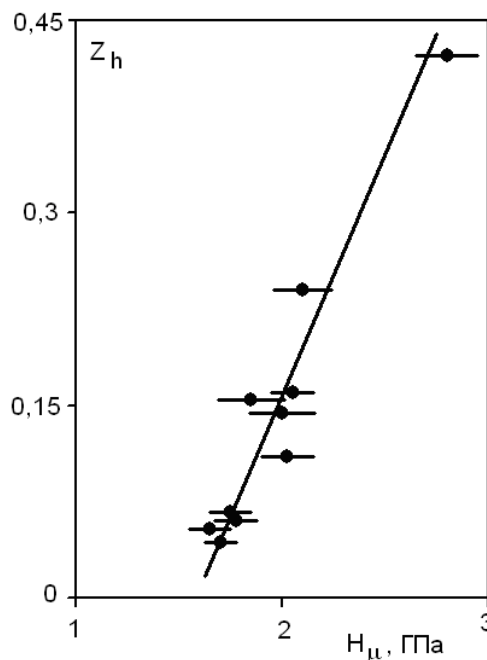


Рис. 3. Залежність кавітаційної стійкості від мікротвердості покриттів.

Видно, що при збільшенні H_μ покриття його стійкість до дії кавітації зростає. Цю залежність можна представити аналітичним співвідношенням $Z_h = 0,372(H_\mu - H_0)$, де H_μ – мікротвердість, виміряна на поверхні зразка, а $H_0 = 1,57$ ГПа. Результати досліджень залежності Z_h , H_μ від температури формування покриттів показують, що для H_μ має місце наявність максимумів при температурах 245, 355, 410 °C. Як показує аналіз, це пов'язано із динамічним деформаційним старінням (ДДС). Обчислені значення температур при реалізації ДДС для цих покриттів для другого і третього максимумів дорівнюють 380 і 470 °C, відповідно, що на 10 – 17 % більше експериментально виміряних.

Таблиця 1

Характеристики покриттів

№ колонки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_d, A	65	65	65	65	65	65	65	65	135
U, B	0	-50	-100	-150	-200	-50	0	-50	0
T, K	356	426	506	566	643	568	518	628	613
$j_{ст}, B$	-0,15	-0,09	+0,018	+0,145	-0,045	-0,04	+0,094	-0,045	-0,014
$i_a, mA/cm^2$	0,0055	0,0055	0,007	0,008	0,005	0,017	0,0045	0,006	0,004
j_a, B	+0,25	+0,45	+0,57	+0,35	+0,5	+0,3	+0,5	+0,3	0,475
$L, мм$	300	300	300	300	300	300	200	200	200
$V_e, мг/год$	0,18	0,33	0,44	0,55	0,63	0,47	0,35	0,55	0,52
$V_n, мкм/год$	14	13	15	11	9	33	29	35	70
$H_m, ГПа$	2,6	2,15	1,99	1,7	1,54	1,84	2,16	1,78	1,9

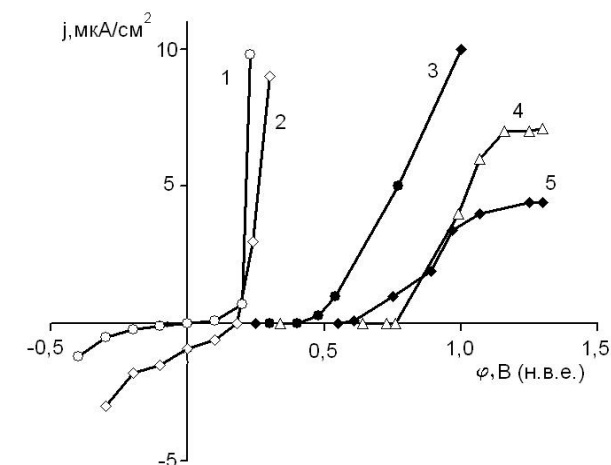


Рис.4. Поляризаційні криві титанових покриттів. (1,3 – 5) розташовані на вісі системи; (2) відхилені від вісі на відстань 120 мм; (1,2) – $p = 8 \times 10^{-2}$ Па, $I_d = 100$ А, $U = -100$ В, $L = 260$ мм; (3 – 5) $p = 4 \times 10^{-4}$ Па, $L = 300$ мм; (3) – $I_d = 135$ А, $U = -50$ В; (4 – 5) $I_d = 65$ А, $U = -100$ В, $U = 0$ В, відповідно

Видно, що для покриттів, одержаних при тискові 4×10^{-4} Па, потенціал активного розчинення в залежності від умов нанесення покриттів змінюється в широкому інтервалі значень. Густина сили струму покриттів в пасивному стані залежить від параметрів технологічного процесу формування покриттів. Характеристики покриттів подано в табл.1, де окрім корозійних властивостей наведено ряд параметрів технологічного процесу нанесення покриттів, а саме: сили струму дугового розряду (I_d), потенціалу на зразкові (U), температури зразка (T), відстані від джерела плазми (L). Також приведені значення швидкості осадження покриттів (V_n), швидкості ерозії при дії кавітації (V_e), мікротвердості (H_m), стаціонарного потенціалу, який настає після 10 хвилин перебування в розчині ($\phi_{ст}$), і визначається по відношенню до хлор-срібного електрода потенціалу початку активного розчинення металу (ϕ_a) та густини сили струму розчинення (i_a) при потенціалі 1,25 В.

Дані таблиці показують, що найбільш схильними до більш довшої пасивації є покриття з найменшими значеннями густини струму пасивного стану, технологічні параметри формування яких наведені в колонках № 7,9. Залежність корозійних характеристик покриттів від їх мікротвердості наведено на рис.5.

Видно, що корозійні властивості покриттів змінюються при збільшенні H_m , проходячи через екстремум, який спостерігається при мікротвердості близько 1,7 ГПа. При цьому потенціал активного розчинення приймає мінімальне значення, густина корозійного струму і швидкість ерозії при дії кавітації максимальні.

З метою визначення можливості підвищення стійкості титанових покриттів проведені дослідження по їх легуванні N, Zr, Ni, Al. Покриття формували, використовуючи два джерела плазми вакуумно-дугового розряду або/та введенням в вакуумну камеру реакційного газу – азоту. Сила струму дугового розряду 100 А для титанового катоду, а для катодів із легуючих металів – від 70 до 120 А. Температура зразків 447...497 °С. Покриття Ti-N наносили при негативному потенціалі на зразкові 200 В. Експериментальні дані по залежності середньої швидкості руйнування TiN-покриттів від мікротвердості подані на рис.6.

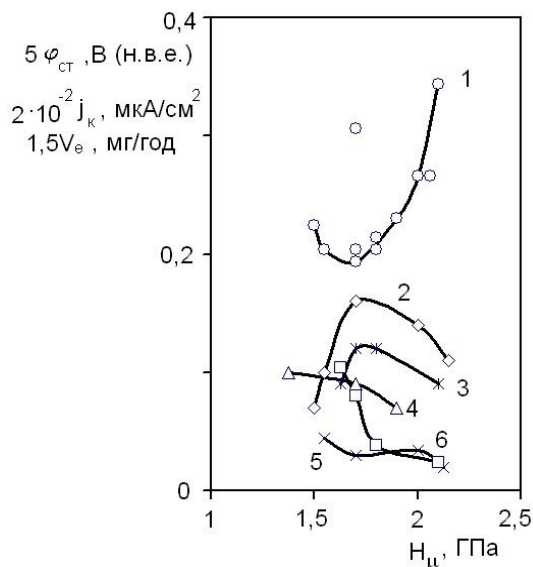


Рис.5. Залежність корозійних характеристик покриттів від їх мікротвердості. (j_k – густина струму пасивного стану) – $\phi_{ст}$; 2,5 – відповідно j_k , V_e , при $I_d = 65$ А, $L = 300$ мм; 3,6 – j_k , V_e , при $I_d = 65$ А, $L = 200$ мм; 4 – j_k , при $I_d = 135$ А, $L = 200$ мм

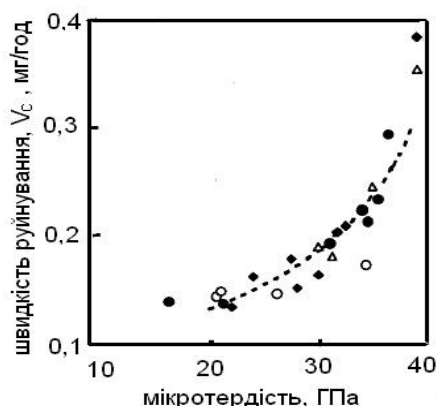


Рис.6. Залежність швидкості руйнування покриттів від їх мікротвердості

Із рис.6 видно, що для покриттів, які мають значення $H \sim 37...39$ ГПа швидкість ерозії під дією кавітації максимальна, що обумовлене наявністю в покритті фази Ti_2N .

Абразивний знос покриттів досліджено як до опромінення іонами дейтерію, так і після нього. Результати подано на рис.7.

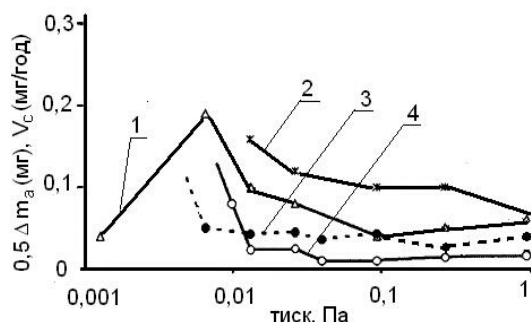


Рис.7. Втрати маси покриттів, обумовлені дією кавітації (1,2) та абразиву (3,4) до опромінення іонами дейтерію (1,3), та після нього (2, 4)

Видно, що після опромінення покриття абразивна стійкість його поверхневого шару зростає, а кавітаційна дещо зменшується. Формування поверхневого шару вірогідно пов'язане з утворенням дейтеридонітридів або ще більш складних сполук за участю кисню і вуглецю вакуумної атмосфери.

Корозійні властивості висхідних матеріалів і покриттів досліджено при $25^\circ C$ в 3 %-ному водному розчині NaCl за допомогою потенціостата. Поляризаційні криві одержано при зміні потенціалу 3 рази в прямому і в зворотному напрямку. Потенціал змінювали на 0,1 В і витримували 120 с. Результати досліджень подано на рис.8.

Дані рис.8 показують, що сталь 15X11МФ має низьку корозійну стійкість, яка збільшується після азоту-

вання сталі. Покриття більш стійкі порівняно із азотованою сталлю. Порівняння ерозійних та корозійних властивостей сталей і розроблених захисних покриттів наведено в табл.2.

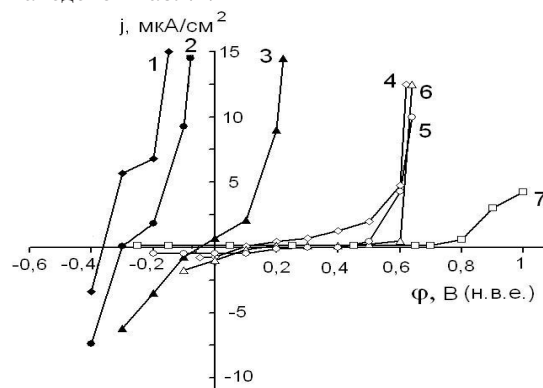


Рис.8. Поляризаційні криві сталі і покриттів у 3%-ному розчині NaCl вихідний зразок сталі 15X11МФ (1); після азотування 15X11МФ (2); покриття: Ni (3), ZrN (4), TiN (5), TiNi (6), Ti (7)

Дані таблиці показують зменшення ерозійної стійкості досліджених сталей в умовах дії кавітації в 3 %-ному водному розчині хлориду натрію від 1,5 до більш ніж в 3 рази. Подібним чином зменшується і абразивна стійкість. Ерозійна та корозійна стійкості TiN та Ti+TiN покриттів в цих умовах значно вищі.

Розроблені захисні покриття системи Ti+TiN нанеє сени на робочі лопатки частини низького тиску парових турбін (ст.№1) Новочеркаської та (ст.№9) Зміївської ТЕС. Термін експлуатації більше 150 тис. годин. На рис.9 подано загальний вигляд лопаток з покриттями, встановлених в турбіну Новочеркаської ТЕС.

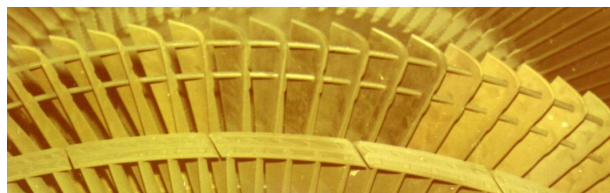


Рис.9.Лопатки з покриттям в турбіні

Таблица 2

Матеріал	Характеристики матеріалів по відношенню до сталі 15X11МФ в стані постачання			Корозійні властивості	
	Кавітаційна стійкість		Абразивна стійкість	Потенціали (В) у 3%-ному розчині NaCl	
	у воді	у 3%-ному розчині NaCl		Стационарний	Активного розчинення
Ст.15X11МФ (висх.)	1	0,67	1	-0,3	-0,2
Ст.15X11МФ (азотована)	2,4	1	1,5	-0,345	-0,2
Ti	0,38	0,6	0,29	+0,14	+0,8
TiN покриття	1,5 - 11	>3	3	+0,25	+0,6

4. Висновки

Опрацьовано оптимальні технологічні параметри формування покриттів із ерозійної плазми катодів вакуумно-дугового розряду, що забезпечує необхідні механічні та корозійні властивості покриттів для захисту елементів теплотехнічного обладнання.

Виготовлено зразки захисних покриттів систем Ti, TiN, Ti+TiN. Одержано дані по їх структурі, мікротвердості, абразивному зносу, ерозійних при дії кавітації та корозійних характеристиках в 3 %-ному водному розчині NaCl.

Встановлено, що покриття мають більш високі значення ерозійно-корозійної стійкості порівняно із сталями 20 і 15Х11МФ, із яких виготовляють елементи теплотехнічного обладнання.

Працездатність розроблених захисних покриттів та перспективність розробленого способу їх формування підтверджені 150 тис. годин експлуатації робочих лопаток в реальних умовах роботи Новочеркаської та Зміївської ТЕС.

Література

1. Сигал, Е.М. Ранжирование отклонений от нормальной работы оборудования АЭС по степени их влияния на коэффициент использования установленной мощности [Текст] // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92, вып. 3. – С. 181–188.
2. Гулина, О.М. Анализ загрязненности трубчатки ПГ и оценка межпромывочного периода методами диффузионных процессов. / К.А., Корниенко, Н.Н. Павлова [Текст] // Известия ВУЗов России, Ядерная энергетика. – 2006. – № 1. – С. 27–30.
3. Otakar, J. Turbine Steam Purity [Текст] // Combustion. – 1978. – Т. 50, № 6. – Р. 11–27.
4. Бараненко, В.И. Учет эрозионно-коррозионного износа при эксплуатации трубопроводов АЭС [Текст] // Теплоэнергетика. – 2004. – № 8. – С. 34–38.
5. Маринин, В.Г. Эрозия PVD-покрытий при воздействии кавитации и пароводяного конденсата [Текст] / Сб. докладов ICVTE-5. – Харьков: – ННЦ ХФТИ, – 2002. – С. 177–180.
6. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Харьков: – ННЦ ХФТИ, – 2005. – 212 с.
7. Коваленко, В.И. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні [Текст] / В.Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1998. – № 5(71). – С. 83–89.
8. Мовчан, Б.А. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония [Текст] / Б.А. Мовчан, А.В. Демчишин. // ФММ. – 1969. – Т. 28, вып. 4. – С. 653–660.
9. Свойства элементов [Текст]: Справ. изд. / Под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.

Запропонована конструкція пристрою для створення слухової апаратури, а саме: електронна біонічна система людського слуху

Ключові слова: біонічна система людського слуху, датчик механічних коливань, альтернативний слух

Предложена конструкция устройства для создания слуховой аппаратуры, а именно: электронная бионическая система человеческого слуха

Ключевые слова: бионическая система человеческого слуха, датчик механических колебаний, альтернативный слух

This article represents construction of device for creating the auditory apparatus, namely electronic bionic system of the human hearing

Key words: bionic human hearing system, a sensor of mechanical vibrations, hearing alternative

УДК 616.28-089.24

ПРИСТРІЙ СЕНСОРНИХ СИГНАЛІВ

М.В. Худобін

Кандидат технічних наук, доцент*

О.М. Мороз

Доктор технічних наук, доцент*

М.Л. Лисиченко

Доктор технічних наук, професор*

А.К. Шевченко

Інженер

*Кафедра автоматизованих електромеханічних систем

Харківський національний технічний університет ім. Петра Василенка

вул. Артема, 44, м. Харків, Україна, 61002

Контактний тел.: (057) 712-50-56